

MODELADO DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZO (SICP)

OSCAR FABIAN MORANTES DELGADO

Profesor Cátedra

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Universidad Industrial de Santander

oscarmorantes@e3t.uis.edu.co

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

Profesor Asistente

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Universidad Industrial de Santander

hrvargas@uis.edu.co

JAIRO HUMBERTO GUZMÁN MEJÍA

Ingeniero Proyectos ICP ECOPETROL

El limonar km 14 Piedecuesta Santander

jguzman@ecopetrol.com.co

Fecha Recepción: 30 de septiembre de 2006

Fecha Aceptación: 21 de noviembre de 2006

RESUMEN

Este artículo describe el modelado de un sistema que mediante el control del gradiente de temperatura mejora la movilidad de asfáltenos presentes en los crudos pesados de gran abundancia en Colombia y gigantesca reserva energética a nivel global. El sistema SICP se encuentra constituido por un rectificador, conmutador y un sistema de control en lazo cerrado el cual censa variables en fondo de pozo para la inyección controlada de corriente. Se requirió plantear modelos para la impedancia de acoplamiento del sistema con la cara del pozo y la transferencia de la potencia mediante el tubo productor (tubing). El SICP utiliza la energía producto de la optimización de los sistemas de bombeo al reducir la viscosidad, pérdidas por fricción y demás problemas conexos del crudo pesado en ascenso. De igual forma, busca mejorar la producción con un factor de levante superior, así como la reducción de los costos asociados al mantenimiento y parada de producción por obstrucciones en el sistema de extracción.

PALABRAS CLAVE: *Crudos Pesados, Espectro de Impedancia, Factor de Levante, Optimización Energética.*

ABSTRACT

This article presents a system that improves the mobility through the gradient control of temperature of asphalts present in the heavy oils of great abundance in Colombia and gigantic energetic reserves at global level. The SICP system is constituted by a rectifier, switch and a control system in closed loop which takes a census of variables in well's bottom, for the controlled current injection. It was required to create models for the joining impedance of the system with the well's face and the transfer of the power through the tubing. The SICP uses the energy product of the optimization from the pumping systems by reducing the viscosity, lost by friction and other related problems of the heavy oils in ascent. In the same way, it tries to improve the production with a superior lift factor, as well as the reduction of the associated costs to the maintenance and production's stops due to obstructions in the extraction system.

KEY WORDS: *Heavy Oils, Impedance's Spectrum, Lift Factor, Energy Optimization.*

INTRODUCCIÓN

Entre los años 2003 y 2030 el consumo de energéticos a nivel global crecerá cerca de un 71%, según la Agencia para la Administración Energética EIA [1]. El mayor porcentaje para satisfacer esta demanda estará asociado con los hidrocarburos. En la actualidad Colombia afronta una crisis de reservas debido al agotamiento de pozos útiles

(crudos livianos), aunque abundan los yacimientos con crudos pesados y extrapesados. Sin embargo, estos últimos son de difícil transporte debido a su alta viscosidad (asfáltenos) y su precipitación (parafínicos), entre otros [2-3]. De igual forma, el interés en la industria química y de combustibles limpios hace poco atractiva su explotación. El SICP representa una alternativa para mejorar el factor de

levantamiento¹ de crudos pesados mediante la inyección de corriente eléctrica en el tubo de producción. Para satisfacer este objetivo se modeló la cara del pozo como una impedancia eléctrica [4 - 6]. Con mediciones efectuadas a corazones extraídos de pozos candidatos, se obtuvieron los parámetros del espectro de impedancia mediante una variante al algoritmo de Cole [7], y optimizado Xiang[8], validado en [9]. Con dichos resultados, se propone la impedancia equivalente de la cara del pozo entre otros importantes hallazgos[10]. Se modeló la transferencia de potencia mediante el tubing empleando a) el modelo línea de transmisión en vacío[11] (tubo productor sin carga de crudo) y b) teniendo en cuenta la impedancia de acoplamiento entre el tubo y crudo pesado con diferentes concentraciones de agua, mediante celda electrolítica. Con los espectros de impedancia se alimenta el sistema de control y se define la estrategia sin perjuicio de las condiciones del pozo [11 - 14]. Mediante el control de gradientes de temperatura se esperan mejorar las movibilidades, optimizando el transporte de crudos pesados en otras situaciones como oleoductos y la estimulación en la cara del pozo, con el ánimo de lograr aumentos de factor de recobro [14 - 17].

FUNDAMENTOS DEL SICP

En este apartado se exponen los principios físicos asociados con viscosidad, sistema de bombeo, empleo de campo electromagnético en la generación de calor para reducir viscosidad.

Optimización de la viscosidad de bombeo SICP:

Cuando una fuerza externa se aplicada a un fluido, esta hace que el fluido se mueva y de ahí surge la viscosidad como una «resistencia o fricción interna» que se opone a la fuerza aplicada. La viscosidad de un fluido depende de: la temperatura, las fuerzas intermoleculares en el fluido, el tamaño de sus moléculas, su masa molecular y otros factores estructurales. El crudo en ascenso sigue la ley de Newton para flujos laminares, por tanto, satisface la Ecuación (1)[22]:

$$F = -\eta A \frac{dv}{dr} \quad (1)$$

Donde F es la fuerza externa aplicada al fluido, η el coeficiente viscosidad, A el área del tubo donde circula el fluido, v la velocidad de los cilindros concéntricos que construyen el fluido y r el radio de los cilindros concéntricos que simulan las capas del fluido. De (1) se obtiene la velocidad de cada compone del fluido como función de la diferencia de presión en los extremos del tubo de producción como:

$$v(r) = \frac{\Delta P}{4\eta} (R_c^2 - r^2) \quad (2)$$

Siendo R_c el radio del tubo productor, r el radio variable entre cero y R , l la longitud del tubo productor, ΔP : la diferencia de presión en el tubo productor, donde la diferencia de presión es producto de la fuerza externa actuando sobre el fluido. En este caso la diferencia de presión es entre la cara del pozo y superficie. De la ecuación (2) se conoce el volumen de crudo que asciende por unidad de tiempo (el flujo neto), como:

$$\Phi = \frac{V}{t} = \int_0^R 2\pi v(r) dr = \frac{\pi \Delta P R_c^4}{8\eta} \quad (3)$$

Donde V es el volumen que asciende en el instante t, la velocidad de ascenso que varía entre cero en la pared del tubo y máxima en el centro del mismo. Los crudos poseen curvas empíricas características de su viscosidad en función de la temperatura, (ver Figura 1). Internacionalmente un crudo se considera pesados cuando posee un °API menor a 20 [19]. Sin embargo, para un cálculo analítico en [20] se propone la variación del coeficiente de viscosidad con la variación temperatura en fluidos laminares, como muestra la Ecuación (4).

$$\eta = ke^{\frac{E_a}{R\Delta T}} \quad (4)$$

Donde k es una constante, E_a la energía de activación, R la constante de gases ideales, T al temperatura. Reemplazando en (4) la Ecuación (3) se obtiene que:

$$\Phi = \left(\frac{\pi R_c^4}{8lk} \right) \frac{\Delta P}{e^{\frac{E_a}{R\Delta T}}} \quad (5)$$

De la Ecuación (5) se concluye, que es una función exponencial del gradiente de temperatura y tiene una relación directamente proporcional con la variación de presión; además que es sensible al gradiente de temperatura, ya que los efectos de los sistemas de bombeo que generan diferencias de presión son importantes pero no en el mismo orden pues es una función lineal de la diferencia de presión. Por tanto, un sistema que caliente el fluido mejorará de

¹ Asociado a la velocidad en ascenso del crudo por el tubo productor

forma exponencial el flujo, mientras un incremento en la variación en la presión solo se reflejara en un incremento proporcional del flujo neto.

En el tratamiento anterior se excluyeron los efectos debidos a la turbulencia generada en sistemas reales; esta la falta de exactitud en las ecuaciones permite una mayor claridad de la explicación.

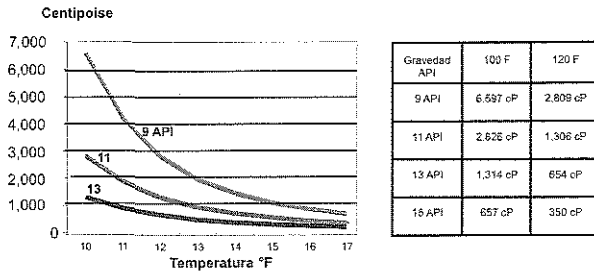


Figura 1. Viscosidad crudo vs temperatura a presión atmosférica Fuente: [30].

Optimización de la fricción en el bombeo SICP

Muchos pozos petroleros fluyen naturalmente a superficie en sus primeras etapas de vida. Lo anterior, tiene como requisito básico que la presión de fondo sea suficiente para superar las pérdidas de presión que ocurren en la trayectoria del crudo a la superficie. Cuando no se cumple esto el crudo deja de fluir naturalmente. Hay dos causas principales para esto: a) la pérdida de presión en fondo cae a un nivel no recuperable para superar las pérdidas del sistema, ó b) las pérdidas son elevadas. Reactivar pozos ó incrementar su producción, requiere equipos de levantamiento artificial. Existen actualmente varios sistemas de reactivación, todos tienen como propósito suministrar la energía requerida para el ascenso del crudo. Un método básico es disponer una bomba en el fondo, para aumentar la presión, este se denomina bombeo mecánico.

El bombeo y en particular el mecánico se encuentra presente en cerca de las dos terceras partes de pozos a nivel mundial, siendo el 80% de las ocasiones empleado en pozos con levantamiento artificial [21], [22], por tanto, se ha considerado SICP en condiciones de bombeo mecánico. La energía empleada en el bombeo se define como:

$$\frac{dp}{dl} = \frac{g}{g_c} \rho \sin \alpha + \frac{\rho v}{g_c dl} + \left(\frac{dp}{dl} \right)_f \quad (6)$$

Donde dp/dl es el gradiente de presión, α el ángulo incli-

nación tubería, ρ la densidad, g la gravedad, g_c el factor de conversión, d el diámetro tubería, f el factor de fricción, v la velocidad del fluido. En esta ecuación se identifican tres componentes, los gradientes hidrostáticos, de aceleración y de fricción, éstos son debidos a cambios en elevación por energía potencial, en la energía cinética, y pérdidas irreversibles de energía asociadas con la fricción del fluido, respectivamente. El último, se puede expresar como:

$$\left(\frac{dp}{dl} \right)_f = f \frac{\rho v^2}{2g_c d} \quad (7)$$

Donde f es función del número Reynolds (N_{Re}) y de la aspereza relativa de la tubería. N_{Re} se expresa como:

$$N_{Re} = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (8)$$

Para realizar el cálculo de fricción se emplean los diagramas de Moody [23], en donde en flujos laminares se observa una relación inversa entre f y la temperatura. Para flujos turbulentos se emplean métodos numéricos, aunque se observa una reducción de N_{Re} con la disminución de la temperatura. Se puede evidenciar que la fricción del fluido (pérdida en bombeo) tiene una relación directa con la viscosidad, la cual tiene una relación exponencial decreciente con la temperatura. Por lo tanto; un gradiente de temperatura controlado podría reducir las pérdidas en presión de los sistemas de bombeo.

Descripción del calentamiento SICP:

En la operación del SICP, la corriente eléctrica genera el calentamiento, por tanto es conveniente conocer la relación entre esta y el gradiente de temperatura.

Empleando la notación E es el campo eléctrico, B el campo magnético, j la densidad de corriente, dx' un diferencial unidimensional, σ la conductividad del medio, V' el volumen, S' la superficie se obtiene que:

$$\underbrace{\int_V d^3 x' j \cdot \vec{E}^{EMF}}_{\substack{\text{Potencia} \\ \text{del} \\ \text{campo} \\ \text{eléctrico} \\ \text{aplicado}}} = \underbrace{\int_V d^3 x' \frac{j^2}{\sigma}}_{\substack{\text{Calor} \\ \text{Efecto} \\ \text{Joule}}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V d^3 x' \frac{1}{2} (\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{H} \cdot \vec{B})}_{\substack{\text{Energía} \\ \text{Campo}}} + \underbrace{\int_{S'} d^2 x' (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot \hat{n}}_{\substack{\text{Potencia}}} \quad (9)$$

Las ecuaciones macroscópicas de Maxwell expresan la interacción de energía y momento entre el campo y la materia, en la Ecuación (9) [23], donde se observa que el segundo término corresponde al calor debido a la existencia del campo en un medio disipativo, por ejemplo, el tubo de producción con crudo y la cara de la formación. El tercer término es importante, ya que está relacionado con la propagación del campo dentro del yacimiento, que incidiría en su calentamiento[25].

Analizando transferencia de calor[18] se tiene que la capacidad específica de calor se expresa por la ecuación (10) como:

$$c = \frac{Q}{m(\Delta T)} \quad (10)$$

En donde c : Capacidad de calor específica, ΔT : Gradiente temperatura, m : Masa sistema a calentar. Cuantificando la disipación de energía eléctrica que genere un incremento ΔT , se obtiene[26]:

$$\Delta T = \frac{I_{rms}^2 R}{mC} \quad (11)$$

Aquí I_{rms} : Corriente eficaz, R : Resistencia eléctrica del sistema. El sistema depende del calor específico, así como de la masa del sistema a calentar y por supuesto de la potencia $P=I_{rms}^2 R$, la cual es la segunda componente de la Ecuación (6).

De la ecuación (11), teniendo en cuenta la Ecuación (5), el flujo neto se obtiene como función de la corriente neta inyectada, la diferencia de presión entre extremos del tubo productor, la curva reológica, las características geométricas del tubo productor, la capacidad calorífica de sus componentes y la impedancia de Thevenin.

MODELADOS SICP

Para realizar el modelado del SICP, se generó un protocolo para la obtención del espectro de impedancia eléctrica en muestras de roca en condiciones nativas. Los pasos a seguir en el protocolo son:

1. Extracción de corazones en pozos candidatos
2. Corte y mediciones en corazón de muestras
3. Desplazamientos de aceite en muestras
4. Preparación y desplazamiento de la salmuera en muestras
5. Disposición de las muestras en el impedanciometro

6. Cambios de saturación
7. Mediciones de resistencia y reactancias
8. Ajuste de datos mediante Software
9. Modelo de la impedancia SICP de la cara del pozo

El equipo empleado en las mediciones fue un impedanciometro constituido por los equipos RCS – 760 Multi Simple, que genera las condiciones de pozo, es decir presión de *overburden*, temperaturas de yacimiento y variación de la saturación en la muestra, y el equipo PM 6304 RLC Meter para la medición de la impedancia de las muestras a frecuencias de 60, 100, 10³, 10⁴ y 10⁵ Hz.

Las mediciones realizadas fueron los datos de entrada para el software desarrollado, con base en el algoritmo modificado de Cole [7] y Xiang [8], para la obtención del espectro de impedancia con base en los cinco puntos medidos mediante el impedanciometro.

$$Z = R_{\infty} + \frac{R_0 - R_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (12)$$

Donde R_0 es la resistencia de la muestra a frecuencia cero, R_{∞} la resistencia de la muestra a frecuencia infinita, τ el periodo característico, α el parámetro de la heterogeneidad ó de dispersión, c es una constante de cambio de variable y el parámetro m es conocido como de límite de polarización.

$$Z = R_0 \left\{ 1 - m \left(\frac{1}{1 + (j\omega\tau)^c} \right) \right\}, \text{ siendo } \begin{cases} \alpha = 1 - c \\ R_{\infty} = R_0(1 - m) \end{cases} \quad (13)$$

El algoritmo consiste en una técnica de inversión directa de Debye, de la Ecuación (12), ó (13), las cuales son la ecuación de Cole[7] en dos formatos diferentes, mediante una estimación por mínimos cuadrados multi-plegüe MFSLⁱⁱ. El procedimiento básico de esta técnica es el siguiente: a) se utiliza una sustitución para eliminar el parámetro R_0 , b) se emplea una estimación por mínimos cuadrados para expresar el parámetro compuesto $x = \tau^c$ como una función de c y R_0 , c) se encuentra una aproximación para el parámetro R_0 , como función de c , a partir de una segunda estimación por multi-plegüe. El paso final consiste en sustituir todos los parámetros estimados en las expresiones encontradas y así obtener un conjunto de ecuaciones lineales de x . Todos los parámetros quedan en función de c , por lo cual se emplean técnicas para la minimización del error cuadrático, obteniendo el valor de c . Por último, se utiliza la técnica de mínimos cuadrados para obtener el valor del parámetro m . El esquema del algoritmo se muestra en la Figura 2.

ⁱⁱ Ingles Multi-Fold Least-squares estimation

Lo obtenido en las Figuras 3 y 4, permite comprobar los resultados obtenidos en [10]. El espectro obtenido corresponde al comportamiento observado en la Figura 3 y 4, para la parte real y compleja de la impedancia. Se puede observar un comportamiento de una carga RC en paralelo producto del comportamiento dispersivo de la cara del pozo.

Dicho comportamiento se manifiesta en una respuesta diferente ante entradas con diferente frecuencia. Para este caso se concluye que la impedancia de la cara del pozo es una carga RC que se comporta en frecuencia como lo muestran las Figuras 3 y 4. El esquemático de la impedancia equivalente se muestra en la Figura 5 siendo esta la impedancia de acoplamiento del sistema con el yacimiento.

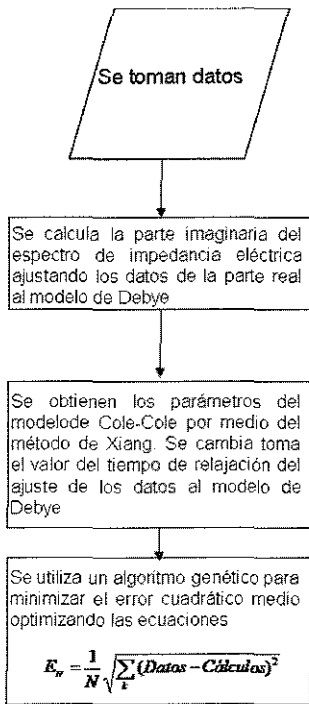


Figura 2. Algoritmo para la obtención de parámetros del modelo Cole-Cole a partir de la muestras de la parte real del espectro de impedancia eléctrica

Fuente: [9]

El tubo de producción fue modelado como una línea de transmisión sin crudo, con lo cual se obtienen líneas de transmisión en serie.

Cada línea representa los cambios por tramos del revestimiento externo del pozo (casing). El resultado de modelo se observa de forma resumida en la Figura 6.

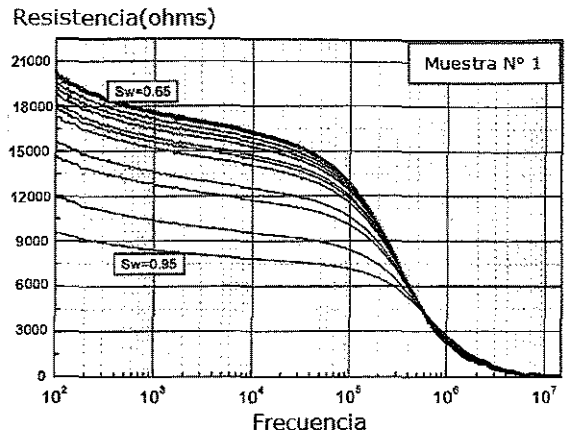


Figura 3. Parte real R de la impedancia vs la frecuencia

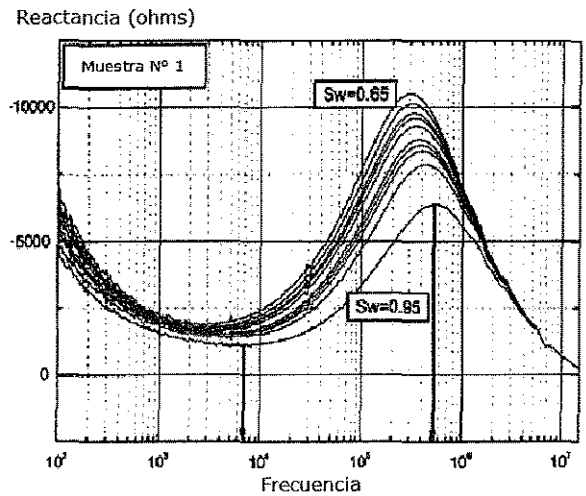


Figura 4. Parte imaginaria X de la impedancia vs la frecuencia

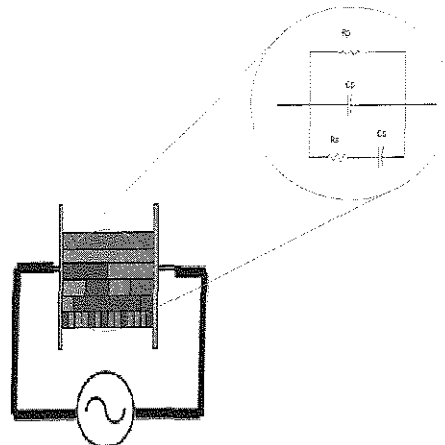


Figura 5. Esquema impedancia equivalente cara del pozo

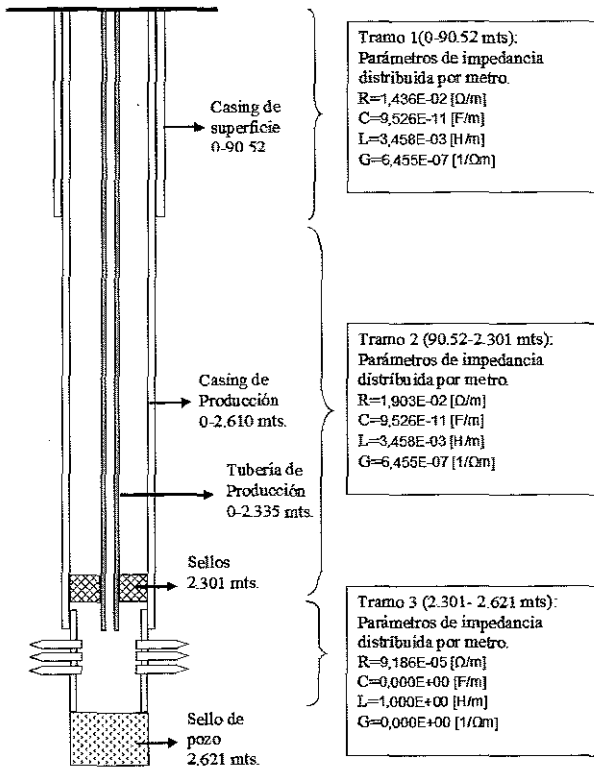


Figura 6. Impedancia distribuida (modelo de línea de transmisión) para la tubería un pozo de producción (caso específico)

ANÁLISIS ECONÓMICO ENERGÉTICO SICP

La ONU proyecta que la población en el 2050 será de 10 mil millones[27], y la EIA [28], proyecta que las reservas probadas de petróleo, gas y carbón se agotarían en 50 años. Es posible incrementar las reservas descubriendo nuevos yacimientos de petróleo, gas y carbón, y obteniendo petróleo adicional de pozos existentes mediante tecnologías costosas de extracción secundaria.

Con el SICP como una herramienta de extracción de crudos pesados se obtienen beneficios contribuyendo no solo con el levantamiento, sino con la disminución en costos y rentabilidad de las empresas que lo implementen, ligados al precio del petróleo en la actualidad ronda los 75 dólares el barril y que tiene un buen comportamiento futuro como se muestra en la Figura 7.

Es de destacar la disminución estimada de los costos de inversión, mantenimiento y operación de las facilidades tal como se observa en la Tabla 1, este ahorro representa entre

otros el ahorro en el uso disolventes, aditivos y equipos de bombeo necesarios actualmente para un mejor aprovechamiento del crudo pesado que hay en pozo, estimulando la productividad, que actualmente decrece en Colombia a cerca de un 30% como se muestra en la Figura 8.

Tabla 1. Estimación de la eficiencia de sistemas de bombeo mecánico PCPⁱⁱⁱ vs crudo pesado tratado SICP y sin tratamiento

Componenete Sistema	Bombeo Mecánico Crudo SICP	Bombeo Mecánico Crudo Pesado	Bomba PCP Crudo SICP	Bombeo PCP Crudo Pesado
Motor	90%	90%	90%	90%
Generador	95%	95%	NA	NA
Bomba Fondo Pozo	85%	<55%	85%	<55%
Transferencia Par Sarta Barrillas	90%	<65%	90%	<65%
Sistema Completo	65%	<30%	69%	<32%

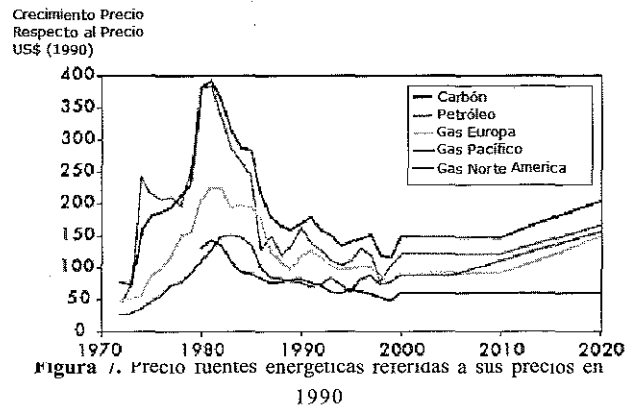


Figura 7. Precio fuentes energeticas referidas a sus precios en 1990
Fuente: [28]

La eficiencia en cantidad de barriles extraídos y pozos aprovechados crecerá en un mayor porcentaje del actual en función de la eficiencia energética de los actuales sistema de bombeo, y que es para el bombeo mecánico cercana a un 45%, llegando en su mayor nivel en las bombas PC a un 64%[29]. Por esto el SICP, emplea la potencia no consumida en el bombeo por la reducción de la viscosidad del crudo y un mejor punto de operación.

ⁱⁱⁱ Bombeo de cavidades progresivas o PCP

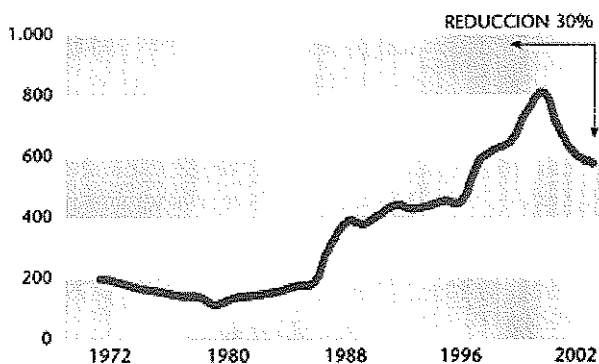


Figura 8. Producción de petróleo en Colombia
Fuente: Estudio fedesarrollo, estadística ECOPETROL

A futuro se ofrece una alternativa mejorada de recobro, que ofrece el levantamiento del crudo con más facilidad hacia la superficie; además de su empleo para evitar la formación de parafina en los tubos y oleoductos por los que se extrae y transporta el crudo liviano y que reaccionan de esta forma al cambio brusco de temperatura, reflejándose en una disminución considerable de costos de limpieza y mantenimiento de estos.

RESULTADOS

Se puede observar que el SICP mediante el incremento en la temperatura reduce las pérdidas de presión en sistemas de bombeo originados por fricción en la tubería, por tanto, mejora el factor de levante respecto de los métodos tradicionales. La optimización energética por parte del SICP, esta asociada con la reducción del consumo energético por parte del sistema de bombeo al reducir su carga mediante el incremento de la temperatura en el tubo productor.

Se pudo mejorar los algoritmos de Cole [7], Xiang [8] mediante la implementación realizada por Miranda [9], para la obtención del espectro de impedancia de la cara del pozo. El espectro obtenido, permite comprobar el modelo dispersivo de la cara del pozo de acuerdo con los resultados del trabajo de Quinxin S, Qining F. y Zuoyuan S [10].

CONCLUSIONES

Es posible optimizar energéticamente la producción de petróleo mediante la implementación de sistemas que reduzcan la viscosidad del crudo en ascenso, reduciendo las pérdidas de presión asociadas a fricción del crudo en movimiento.

La saturación y porosidad de las muestras están asociadas con las frecuencias críticas del espectro de impedancia, se deja la puerta abierta para futuros trabajos que permitan evidenciar la relación funcional de estos parámetros con el fin de mejorar la caracterización de los parámetros petrofísicos de yacimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Caruso G. Coloquio Centro para Estudios Estratégicos e Internacionales (CSIS), de Washington, Agencia para la Administración Energética EIA, EE.UU., junio 2006
- [2] Cáceres O. Proyecto: Alternativas para el Tratamiento y Transporte de Crudos Pesados, Colciencias - ICP ECOPETROL 2005
- [3] Rodríguez, M. Castañeda Estudio de los fenómenos de cristalización de parafinas en el comportamiento fluidodinámico de crudos parafínicos-fase I. ECOPETROL - Instituto Colombiano del Petróleo, A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia
- [4] Trans., AIME. El efecto de la temperatura sobre la densidad y la resistividad eléctrica del Cloruro de Sodio en soluciones. (1953) 198 327-28.
- [5] Knight, R. J. Nur, A., and Raistrick I. D. Modelado de la Respuesta Eléctrica de Arenisca Mediante un Circuito Eléctrico, 26th Simposio Anual de Registros, 1985
- [6] Knight, R. J. Nur, A., and Raistrick I. D. La Constante Dieléctrica de la Arenisca entre 60 kHz a 4 MHz, Geophysics 52, 644-654, 1987
- [7] Cole, K. S., Y Cole R. S. Dispersión y absorción en dieléctricos, 1941, Alternation current characteristics: 3. Chem. Phys. 9, pg. 341 - 351.
- [8] Xiang J, Jones N. Cheng D, Schlindwein F. Direct inversion of the apparent complex-resistivity spectrum. Geophysics, Vol 66 N° 29, 2003, pp 647 - 654.
- [9] Miranda D. Trabajo de investigación (Magíster Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Fisicomecánicas. Ingeniería de Electrónica. Bucaramanga. 2005.
- [10] Quinxin S, Qining F. y Zuoyuan S. Electrical impedance variation with water saturation in rock., 2000, Geophysics Vol. 65 pg 68 - 75.
- [11] John R., Frederick J., Robert W. Foundations of Electromagnetic Theory, 2003.

- [12] Bridges, J. Dubiel, G. Power sources for downhole electrical heating. Patente 2015318. Oficina de Patentes de Canadá
- [13] Bridges, J. Corrosion Inhibition Methods and apparatus for downhole electrical heating in mineral fluid wells. Patente 2012328. Oficina de Patentes de Canadá
- [14] Bridges, J. Electrical Heating Systems for low cost retrofitting of oil wells. Patent 2090629. Oficina de Patentes de Canadá
- [15] Hagedorn, Alton R. Oil recovery by combination steam stimulation and electrical heating. Patente 3946809. Oficina de Patentes de los Estados Unidos.
- [16] Killoughand, J.E. And Gonzalez. A Fully-Implicit Model for Electrically Enhanced Oil Recovery., J.A. SPE 15605. 1986.
- [17] McPherson R., Chute F. y Vermeulen F. Recovery of Athabasca bitumen with the Electromagnetic Flood (EMF) process, 1985 The Journal Petroleum Canadian January February pg 44-51.
- [18] Kreith, Frank. Principios De Transferencia De Calor. Mexico Thomson Learning, 2001.
- [19] PDVSA, Fundamentos de ingeniería de petróleos, Venezuela, 2005.
- [20] Eirich, Frederick R. Rheology; Theory And Applications. New York : Academic Press, 1960.
- [21] Rothrock R. Jr. Maintenance, Workover Costs to Top \$3 Billion, Petroleum Engineer International. Julio USA 1978.
- [22] Grigorahshtsento G. General Features of the Technological Developments in Oil Production. Rusia Julio 1976.
- [23] Moody L. Friction Factors for Pipe Flow, Transactions of American Society of Mechanical Engineers Vol 66 USA 1964
- [24] Carozzi A, Erikson A, Lundborg B y Thidé B. Electromagnetic Field Theory. Swedish Institute of Space Physics, 2003.
- [25] Ovalles C., Fonseca A., Lara A., Alvarado V., Ranson A., Mendoza H. (SPE). Opportunities of Downhole Dielectric Heating in Venezuela: Three Case Studies Involving Medium, Heavy and Extra Heavy Crude Oil Reservoirs. PDVSA-INTEVEP, Venezuela 2002.
- [26] Genert C. Common Sense Approach to Thermal Imaging. SPIE Optical Engineering Press, USA 2000.
- [27] ONU Naciones Unidas. World Population Prospects: The 2000 Revision Highlights, USA (2001).
- [28] Priddle R. Ex. Director Agencia para la Administración Energética EIA, World Energy Outlook. EE.UU. 2000.
- [29] Takács G. Bombeo Mecánico Moderno. USA 1990.
- [30] Beal C. The viscosity of air, Natural Gas, Crude Oil and its Associated Gases at Oilfield Temperatures and Pressures, Transactions of American Institute of Mining and Metallurgical Engineers Vol. 165, USA 1946.